

STELLA를 이용한 충주댐의 시뮬레이션 모형 개발

정상만* / 이주현** / ○유찬중***

1. 서 론

정치·사회적인 문제로 확대되고 있는 수자원 개발이 더 이상의 진행이 어려운 실정에서 수자원의 안정적인 수급계획을 수립하기 위해서는 정확하고 합리적인 용수수요 추정 모형에 의해 객관적이고 신뢰성 있는 결과를 나타낼 수 있는 기술 개발이 필요하다.

최근 들어 인구의 급속한 증가와 산업의 팽창으로 인하여 용수 수요도 기하급수적인 증가추세를 나타내고 있는 반면에 대부분의 용수를 공급하고 있는 다목적 댐의 시설용량은 포화상태에 있다. 특히, 기개발된 용수원의 물오염으로 상류지역의 맑은 물에서 취수하려는 과정에서 상류지역의 반대에 부딪쳐 물배분이 더욱 어려워지면서 지방자치단체간의 수리권이 문제화되면서 용수공급 능력에 대한 적절한 검토가 필요한 실정이다. 다목적 댐의 주된 역할은 홍수피해의 방지와 전력에너지의 공급, 생·공·농업용수 및 하천유지용수 수요를 안정적으로 공급하는 것이며, 그 이외에도 댐 저수지의 유람선 관광과 위락시설 제공 등과 같은 기능을 갖고 있다.

본 연구에서는 이미 선진국에서의 적용에 따른 검증이 완료되었고 수자원 시스템공학 분야, 최적화기법 분야, 댐 운영분야 등에 널리 활용되고 있는 스텔라(System Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation, STELLA)를 이용하여 충주댐 시뮬레이션 모형을 운영하였으며, 조건에 따른 저수용량의 변화를 파악하여 용수수요에 따른 수자원의 공급가능성을 분석하였다.

2. 모형의 개요

2.1 스텔라(System Thinking Experimental Learning Laboratory with Animation, STELLA)

물관리 및 저수지 모의운명을 위한 시스템 구축을 위해서 다양한 컴퓨터 모형이 사용되어지고 있으며 발전되어 왔다. 1980년도에 미국공병단(U.S. Corps of Engineers)에서 개발된 HEC-3 와 HEC-5가 홍수조절 및 물관리 시스템 구축에 많이 사용되었으며, 물배분과 댐운영에 있어서는 최적화 모형도 많이 사용되었다.

특히 물관리 및 유역간의 물배분을 위한 공영시각모형의 컴퓨터 환경에는 1992년 High Performance Systems에서 개발된 스텔라(STELLA)를 비롯하여 1992년 Imagine That에서 개발된 익스텐드(EXTEND), 1995년 MicroWorlds에서 개발된 파워심(PowerSim), 1991년 The Math Works에서 개발된 시뮬랩(SIMULAB), 그리고 1993년 DS Group에서 개발된 디에스랩프로(DS LabPro) 등이 사용되고 있다.

이중에서 스텔라를 이용한 시뮬레이션 모형은 미국을 비롯한 선진국에서 다양하게 이용되고 있는 모형으로써 강력한 유저 인터페이스(User Interface)의 활용으로 다양한 이익단체들의 참여를 도모할 뿐 아니라 여러 가지 선택적 대안을 제시해 줄 수 있기 때문에 물 관련 당사자들이 참여하여 대안을 선택하는 해법을 제시할 수 있다.

* 공주대학교 건설환경공학부 교수 · 041-850-8628 (E-mail : smjeong@kongju.ac.kr)

** 중부대학교 건설공학부 조교수 · 041-750-6774 (E-mail : leejh@joongbu.ac.kr)

*** 한국종합기술개발공사 사원 · 031-792-0401 (E-mail : cjyoo@joins.com)

2.2 모형의 입력자료 구성

2.2.1 댐 유입량자료

충주댐의 시물레이션 모형에 입력되는 유입량 자료는 댐이 완공된 1985년 5월부터 2002년 7월까지의 총 879주에 해당하는 각 주별 유입량을 입력하였다.

2.2.2 유역내 용수수요

한강유역은 수도권권을 포함하고 있어 산업의 첨단화와 문화수준의 고도화로 인해 지역적으로 타지역에 비해 과밀화를 초래하였고, 전국대비 지역경제 총량비중은 절반 가까이 차지하며 또한 매년 증가추세에 있다.

1960년대 이후 산업화, 도시화는 물론 국민소득의 증가로 물소비량이 지속적으로 증가하고 있으며 또한 생활수준의 향상으로 물사용에 있어서도 양적으로 풍부하고 질적으로도 깨끗한 물공급을 강력히 요구하고 있다.

표 2.1은 충주댐에서 공급하게 되는 지역의 용수수요량을 나타낸 것으로 팔당댐 상류 지역의 총용수수요량은 과거자료에 기반을 둔 회귀분석 방법으로서 기존의 용수공급 자료를 바탕으로 용수수요 곡선이 시간에 대한 함수가 되어 예측하도록 설정하였다.

2021년의 충주댐에서 공급하는 팔당댐 상류지역의 용수수요량은 1,114.6백만 m^3 /년으로 증가할 것으로 예측되며 수도권 지역을 포함하였을 경우에는 2,978.0백만 m^3 /년으로 증가한다.

표 2.1 용수수요량

(단위 : 백만 m^3 /년)

년 도	팔당댐 상류					수도권 지역 포함				
	생활용수	공업용수	농업용수	하천유지용	합 계	생활용수	공업용수	농업용수	하천유지용	합 계
2001	105.1	121.6	522.3	334.0	1,083.0	1,518.1	281.8	589.6	334.0	2,723.5
2006	110.2	126.7	522.3	334.0	1,093.2	1,588.0	295.1	589.6	334.0	2,806.7
2011	112.3	131.4	522.3	334.0	1,100.0	1,667.8	308.1	589.6	334.0	2,899.5
2016	114.7	136.3	522.3	334.0	1,107.3	1,719.3	321.2	589.6	334.0	2,964.1
2021	117.3	141.0	522.3	334.0	1,114.6	1,720.2	334.2	589.6	334.0	2,978.0

2.2.3 댐 운영곡선(Dam rule curve)

댐 운영곡선은 하루 하천유지유량, 발전방류량을 비롯하여 농업용수를 포함한 가뭄 및 홍수조절기능을 하는 댐의 역할을 고려하여 과거 자료를 바탕으로 계절적 형태와 댐 방류량을 참고하여 만들어진다.

충주댐의 경우는 계절적 인자, 즉 장마철을 대비한 저수지의 여유확보와 가뭄을 대비한 저수지의 수량확보를 기반으로 작성된 운영곡선이 존재하고 있지 않고 댐 운영실적을 바탕으로 댐을 운영하고 있기 때문에 본 연구에서는 기록년의 수위자료를 가지고 가장 가뭄이 극심해서 최저 수위를 유지했던 2001년을 최소값(Min)의 수위로 하여 Rule 1으로 설정하였다.

최대값(Max)의 경우 봄과 겨울의 저수위를 기준으로 해서 최대를 유지하는 1990년의 자료를 Rule 3로 결정하였고, 중간값(Mid)은 1993년의 수위를 Rule 2로 적용하여 충주댐 시물레이션 모형의 운영곡선으로 결정하였다.

그림 2.1은 스티라 모의 모형에 입력되는 저수지 수위 변화의 경향을 도시화한 것으로 홍수기에 해당하는 26주에서 32주까지의 기간에는 Rule 2(1993년)에 해당하는 수위가 Rule 3(1990년)의 수위보다 작게 나타났는데, 이 시기에는 집중호우로 인한 댐수위의 증가를 예방하기 위하여 미리 방류를 하여 댐수위를 작게 설정하게 되는데, 유입량이 적었던 Rule 3(1990년)은 봄가뭄으로 인하여 방류를 적게 실시하였기 때문에 댐수위가 높게 측정되었다.

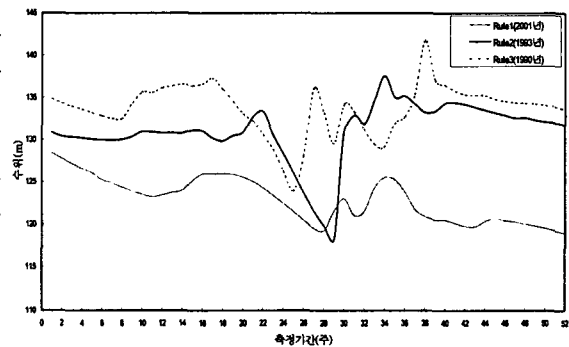


그림 2.1 충주댐 운영곡선(수위)

2.2.4 시스템 구성

충주댐의 모의운영은 가뭄을 고려하지 않은 상태에서 수량의 안전확보를 위해서 불필요한 유출을 줄이는데 초점을 맞추어 모형을 구축하였다. 여기에서 안전공급율은 저수지로부터 확보할 수 있는 최대의 수량을 말하는 것으로 농·공·생활용수 모두를 포함하고 있으며 역사적인 기록에 근거하여 일년에 딱 한번만의 저수지 운영 실패를 허용하는 값이다. 저수지 운영실패는 수요의 증가로 인한 물부족의 발생으로 댐의 사수용량 이하의 물을 공급해야 하는 상황을 나타낸다.

그림 2.2는 충주댐의 모식도를 나타낸 것이며 모형의 목적함수는 용수의 공급과 수요의 차이를 최소화하여 불필요한 물의 손실을 최적화화 하는데 있다. 여기서의 용수공급량의 수요량은 농·공·생활용수, 발전용수, 그리고 하천유지유량을 모두 포함한 값이다. 또한 시간 $t=0$ 일때는 초기값을 말하며 n 은 1985년 5월부터 2002년 7월까지의 약 18년간을 주별로 표현하여 최종 n 값은 879주일이 되며 목적함수와 상태방정식은 다음 식 (1)과 식(2)와 같다.

$$\text{Minimize } F = \sum_{t=0}^n (R_t - D_t) \quad (1)$$

$$S_{t+1} = S_t + I_t - R_t \quad (2)$$

- 여기에서, R_t : 충주댐의 용수공급량(농·공·생활용수, 하천유지유량)
- D_t : 충주댐의 용수수요량(농·공·생활용수, 하천유지유량)
- S_t : 주어진 시간에서의 각 저수용량

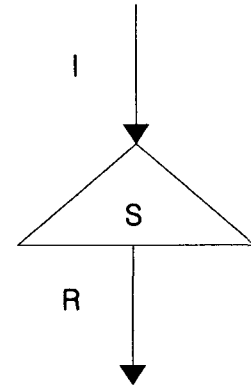


그림 2.2 충주댐 모식도

충주댐 모의운영을 위한 공급량의 제약조건은 공급수량의 제약조건의 비상시를 대비한 사수용량을 최소값으로 보고 홍수조절을 위한 댐의 역할을 고려해서 최대값을 결정하였고, 용수수요량은 여수로를 제외한 발전용 터빈의 용량과 도수터널의 용량, 그리고 최소한의 생태계보전을 위한 하천유지유량을 고려해서 최소값과 최대값을 구하였다.

이상과 같은 조건을 부여하여 최종적으로 구축된 충주댐 시뮬레이션 모형의 운영을 위한 사용자 레벨과 개발자 레벨은 각각 그림 2.3과 그림 2.4와 같다.

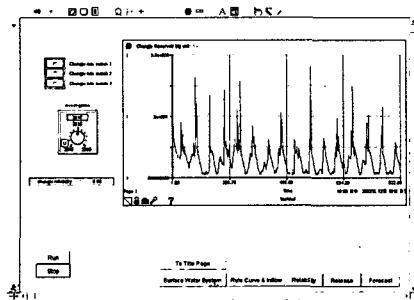


그림 2.3 충주댐 시뮬레이션 모형의 사용자 레벨

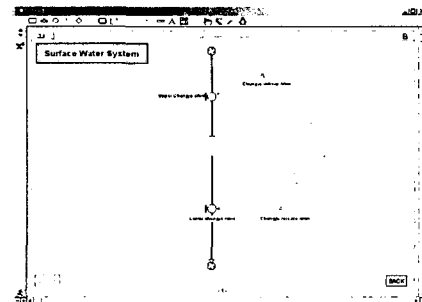


그림 2.4 충주댐 시뮬레이션 모형의 개발자 레벨

3. 모의운영 결과

본 연구에서 구축한 충주댐의 스텔라를 이용한 시뮬레이션 모형은 1985년 댐운영이 시작된 이후의 역사적인 사상을 바탕으로 장래에 예상되는 용수수요의 증가를 임의로 가정하여 이 때 반응하는 충주댐의 안전율을 검토하였다. 용수수요의 증가는 저수지 운영의 안정성을 검토할 수 있는 중요한 변수로 용수공급 시스템의 민감성을 분석할 수 있다.

안전공급율은 저수지로부터 확보할 수 있는 최대의 수량으로 농·공·생활용수 및 하천유지용수를 모두 포함하는 것이며, 물부족으로 인하여 사수위 이하의 물을 공급하는 상황이 일년에 딱 한번만 발생할 때의 저수지 운영실패를 안전한 것으로 판단하며, 그 이하의 경우는 용수공급에 문제가 있는 것으로 규정하게 된다.

표 3.1은 표 2.1에 제시한 주별 저수용량을 충주댐 모의운명을 위한 저수지 운영곡선에서 저수지의 수위가 최소값이었던 2001년을 Rule 1, 중간값 1993년을 Rule 2, 그리고 최대값 1990년을 Rule 3으로 저수지의 기본 연간 운영 계획으로 각각 적용할 때의 저수지 반응에 대한 안전공급율을 나타낸 것이다.

표 3.1 용수수요 증가에 따른 충주댐 안전공급율 (단위 : %)

년 도	팔당댐 상류			수도권 지역 포함		
	Rule 1*	Rule 2**	Rule 3***	Rule 1*	Rule 2**	Rule 3***
2005	100	100	100	86	100	100
2010	100	100	100	85	100	100
2015	100	100	100	85	99	100
2021	100	100	100	84	98	100

* 저수지 수위가 최소인 2001년을 기본 조건으로 적용시
 ** 저수지 수위가 중간인 1993년을 기본 조건으로 적용시
 *** 저수지 수위가 최대인 1990년을 기본 조건으로 적용시

4. 결 론

수자원의 안정적인 수급계획을 수립하기 위해서는 정확하고 합리적인 용수수요 추정 모형에 의해 객관적이고 신뢰성 있는 결과를 제시해야 한다. 정치·사회적인 문제로 확대되고 있는 수자원 개발이 더 이상의 진행이 어려운 실정에서 용수공급을 위한 종합적이고 체계적인 수급계획이 더욱 필요한 실정이다.

본 연구는 용수수요 증가에 따른 충주댐의 안전공급율을 제시하는 것으로 하천 수질의 안정성과 수량이 지속적으로 유지가 가능한 지에 대해에 대한 측면을 도시적으로 나타낼 수 있는 모의운영 시스템을 개발하였으며, 연구결과를 정리하면 다음과 같다.

저수지 운영에 대한 수자원의 수요과 공급의 변화를 파악하고 평가하는 기법 개발을 위한 기초 자료인 저수지 운영곡선의 변화에 따른 안전공급율의 변화를 분석해 보면 팔당댐 상류 지역의 용수수요만을 고려하였을 경우 2021년의 안전공급율은 각각 100%로 나타나 안정적인 수자원의 공급이 가능하다.

수도권 지역의 용수수요를 고려하였을 때, 충주댐의 용수공급 가능성을 나타내는 안전공급율의 변화를 분석해 보면 최악의 저수용량을 나타내는 조건인 Rule 1일 때 2005년 86%, 2010년 85%, 2015년 85%, 2021년은 84%로 줄어들어 Rule 1의 상태를 발생하게 되는 가뭄이 지속된다면 용수공급에 심각한 문제점이 발생하게 된다. 평균적인 저수용량인 Rule 2의 조건에서는 2010년까지는 100%로 용수수요가 증가함에 따라 안정적인 용수 공급이 가능하나 2015년 99%, 2021년 98%로 감소하게 된다. 저수용량이 가장 높게 확보되는 조건인 Rule 3을 적용하였을 때, 2021년의 안전공급율은 100%로 용수수급에 문제가 없는 것으로 분석됐다.

본 스텔라에 의해 구축된 모형은 용수수급과 관련한 행정기관장과 자치단체장, 하천사용자, 시민단체 등의 물관련 당사자들이 시스템이 반응하는 변화를 직접 관찰할 수 있으므로 상황변화에 따른 예측과 물상황을 평가할 수 있는 기법으로 경제적인 수자원 관리가 가능할 것으로 판단된다.

5. 참고문헌

건설교통부 한국수자원공사(2000) 수자원 장기종합계획 보고서
 신용노, 맹승진(2000) 모의기법에 의한 홍수기 저수지 운영 모형 개발(I), 한국수자원학회 논문집, 한국수자원학회, 제33권 제6호, pp. 745-755.
 Palmer, R.N., Reese, A.G. and Nelligan-Doran, S.E.(2001) Tied by water, *Civil Engineering, ASCE*, Vol.71, No.2, pp. 50-53.